

坑井内流体挙動計測のためのドップラーボアホール テレビューアに関する研究

著者	齋藤 仁
号	2928
発行年	2002
URL	http://hdl.handle.net/10097/8201

氏 名	さいとう じん
授 与 学 位	齋 藤 仁
学 位 授 与 年 月 日	博士（工学）
学 位 授 与 の 根 拠 法 規	平成15年3月24日
研 究 科、専 攻 の 名 称	学位規則第4条第1項
学 位 論 文 題 目	東北大学大学院工学研究科（博士課程）地球工学専攻
指 導 教 官	坑井内流体挙動計測のためのドップラーボアホールテレビューアに関する研究
論 文 審 査 委 員	東北大学教授 新妻 弘明
	主査 東北大学教授 新妻 弘明 東北大学教授 佐藤 源之
	東北大学教授 金井 浩 東北大学助教授 浅沼 宏

論文内容要旨

本研究は、坑井内流体挙動計測のためのドップラーボアホールテレビューア（DBHTV）の開発を目的として行ったものである。DBHTV は、坑壁イメージングを行うボアホールテレビューア（BHTV）に、流速計測法として用いられている超音波ドップラー法を導入することで、坑井内のき裂分布と流速分布を同時計測し、それらの分布を同程度の空間分解能でイメージングすることが可能なシステムとして期待されている。本論文では、まず、室内モデルシステムを用いて DBHTV の性能限界について実験的・理論的に検討を行い、坑井内のき裂ごとの流速分布を計測可能な DBHTV の設計・製作を行った。次に、製作した DBHTV を用いて室内実験やフィールド実験を行い、実験により明らかとなった実計測のための新たな問題を提示した。最後に、本研究で明らかとなった実計測のための問題についての原因と対策を述べ、DBHTV を実現するためのシステムの構成法について論じた。

以下に、各章において得られた結論についてまとめる。

第1章は緒論であり、本研究の背景と目的、DBHTV の地下計測における位置付けや DBHTV の概念、およびパルスドップラー計測における信号処理法について述べた。

第2章では、室内モデルシステムを用いて DBHTV によるき裂分布と流速分布のイメージング結果を示し、その実験結果に理論的な検討を加え、DBHTV の性能限界について検討を行い、DBHTV の期待される空間分解能・流速分解能について定量的評価を行った。

まず、室内モデルシステムを用いて坑井内環境を模擬した実験を行った。そこでは、反射計測とドップラー計測の同時計測によるき裂分布と流速分布のイメージングを行い、その結果を定量的に評価した。また、ドップラー計測によって得られた流速分布からき裂へ流れ込む流量を算出し、その結果が真値と良く一致しており、さらに、き裂を流れる流量やき裂の大きさに関わらず、計測された流速分布から流量を求めることが可能となることを示した。

次に、ドップラー計測における散乱波を検出するサンプルボリュームの位置と流速分布の空間分解能の関係を検討した。そこでは、サンプルボリュームの坑壁からの距離を変えながら流速分布を計測し、このとき計測された分布から、DBHTV がき裂付近の流れを高分解能に計測することが可能なシステムとして期待できることを述べた。

最後に、室内モデルシステムを用いた計測結果から、DBHTV として期待される流速分布の空間分解能や計測可能な流速範囲についての検討を行った。BHTV による反射計測とドップラー計測の両立性を有するための計測条件を適用し、DBHTV がき裂分布と流速分布を高分解能にイメージングすることが可能であることを示した。さらに、ドップラーシフトの検出法として、パルスペア法を導入することでリアルタイム性を有しながら、流速測定範囲も拡張することが可能なシステムとして坑井内計測に用いることが期待されることを述べた。また、ドップラー計測により計測された流速分布の空間分解能は $10\sim 50\text{mm}^2$ 程度とき裂分布と同程度の高分解能に計測することが可能となることを示した。さらに、流速分解能は最小検出能が 1mm/s 程度まで計測可能となり、従来の坑井内流体挙動計測システムより高分解能にき裂ごとの流速分布を計測可能であることを述べた。

第3章では第2章で得られた知見や既存の BHTV や超音波ドップラー法の仕様に基づいて、坑井内計測のための DBHTV の仕様を設定し、実計測のための DBHTV の構造およびエレクトロニクス部の設計を行った。

まず、DBHTV は坑井内計測システムとして求められる耐環境性を有し、坑井内計測において想定される、計測機器の故障や坑壁の崩壊などのトラブルに柔軟に対応できるようなシステムとする必要があるため、既存の BHTV にドップラー計測部を組み込む構造として設計を行った。さらに、DBHTV を用いて坑井内のき裂ごとの流速分布をイメージングするための計測条件について、超音波中心周波数やパルス繰返し周波数などを定量的に評価し、従来のシステムより高分解能に流体挙動計測を可能となるシステムの仕様として設定した。

次に、エレクトロニクス部として、反射計測・ドップラー計測共通部、送受信切換・ゲーティング部、ドップラー計測部、反射計測部のそれぞれについて、信号の流れを把握するためにアナログ回路として設計を行った。

反射計測・ドップラー計測共通部では、DBHTV に用いるトランスデューサの仕様を検討し、DBHTV において反射計測とドップラー計測が可能な発振器としてトーンバースト駆動発振器を導入したことを述べた。

送受信切換・ゲーティング部では、水晶発振器に同期させたゲーティング回路の設計を行い、地下計測での安定した計測が可能なシステムとして設計を行った。

ドップラー計測部においては、第2章で用いた室内モデルシステムや超音波血流計などを参考として、検層器内部に組み込むことができるシステムとして設計を行った。そこでは、超音波の中心周波数として 1.2MHz を使用するため高周波回路技術も導入し、高周波増幅器や直交検波回路を設計した。

反射計測部は、既存の BHTV と同等な処理を行うシステムとして、き裂分布のイメージングが可能なシステムとして設計した。

これらの設計に基づき DBHTV を開発することで、坑井内のき裂ごとの流速分布を計測することが原理的に可能なシステムとなることを述べた。

第4章では第3章の設計に基づき製作した DBHTV 計測システムについての評価を述べるとともに、製作過程において実施したノイズ対策について述べた。さらに、製作した DBHTV 計測システムを用いて室内実験やフィールド実験による動作試験を行った結果を示し、その性能や実計測のために明らかとなった問題について論じた。

まず、製作した DBHTV の外観図を示し、ロータリートランスデューサ部やエレクトロニクス部などの構造を坑井内計測に適したものとして製作したことを述べた。さらに、製作した DBHTV のトランスデューサの性能評価や電子回路などのノイズ対策として、ロータリートランスデューサ部、エレクトロニクス部、信号伝送部について検討した。ロータリートランスデューサ部に関しては、トランスデューサの特性評価を行い、本研究で製作した DBHTV では計測可能な坑径の大きさや検層器の坑壁との傾きに許容制限があることなどを示した。エレクトロニクス部に関しては、ドップラー信号を計測する S/N を得るために、電源部やグランド部などにアイソレーションを施すなどのノイズ対策が必要であることを述べた。信号伝送部では、長距離の信号伝送のために信号の周波数帯域を低周波としたことや送受信部に対策を行ったことを述べた。

次に、室内実験を行い製作した DBHTV 計測システムの動作確認やその特性を検討した。本室内実験では、模擬き裂を流れる流体の流量に対応したドップラーシフトを計測することができたが、超音波ビームを走査させて流速分布を計測するためにトランスデューサを回転させた計測では、回転周期に同期したノイズが観測されたことを述べた。

次に、東八幡平フィールドにおいて実験を行い、実計測のための問題点を明らかとした。フィールド実験では、信号伝送距離が異なるため室内実験より S/N は低下しているが坑口付近では動作確認を行うことができた。しかし、坑井内の人工き裂付近に DBHTV を設置した計測ではき裂を流れる流速分布に対応したドップラー信号を計測することはできなかった。これは、本フィールドにおいては、坑内流体からの散乱波を検出する S/N が十分でないことやサンプルボリューム内に反射波が計測されたことなどの問題があることを述べた。

最後に、DBHTV を実用化するためには、本章で明らかとなった実計測における問題点として、トランスデューサを回転させることでドップラー信号に観測されたノイズの原因や、フィールド実験において坑井内の流速分布が計測されなかった原因を明らかとし、実用化のためには DBHTV の構成法を検討する必要があることを述べた。

第5章では、第4章における室内実験やフィールド実験を行うことにより明らかとなった問題点について、それぞれの原因を特定し対策法を提示した。そこでは、以下に示す4つの項目について検討を行った。

1. トランスデューサの振動によるビーム方向の速度成分がドップラー効果をもたらし、その速度成分がドップラーシフト分布に計測されることを述べた。DBHTV 計測の原理に基づいて、その速度

成分によるドップラー効果を定式化し、補正方法としてドップラー計測と同時にトランスデューサの速度信号を計測し、その速度信号を用いてドップラーシフト分布からノイズを抑圧させる方法を提案した。また、モデル実験によりその有効性を明らかにしたが、本研究で製作した DBHTV ではトランスデューサの感度が不足していたため、適用することはできなかった。

2. トランスデューサを回転させて計測を行った結果、ドップラー信号に振幅変調ノイズが計測され、それはロータリートランスデューサ部の構造による、音響インピーダンス不整合が原因であることを述べた。そこで、分布定数回路とドップラー効果の定式化による検討を行い、トランスデューサがウインドウからの反射波を計測していることが確認された。そこで、そのノイズ対策として同条件でのドップラー信号を計測し、同期加算させた信号を用いた減算処理を行うことでドップラーシフト分布を補正する方法を提案し、その手法が有効であることを述べた。
3. DBHTV では、送信パルス波を基準としてサンプルボリュームの位置を設定していたため、サンプルボリューム内にて坑壁からの反射波が検出されることもあった。そこで、サンプルボリュームの位置を、反射波を基準としたものとして設計し、その概念と回路を示した。さらに、室内実験により、反射波を基準としたゲート回路の有効性を示した。しかし、本手法を実現する回路製作し、DBHTV 計測システムに導入した実験を行ったが、坑壁からの反射波と散乱波抽出ゲート部のスイッチングノイズを区別することができず、サンプルボリュームの位置がスイッチングノイズを基準としたものとなった。そのため、本手法を適用するためには、ノイズを低減させることやトランスデューサの感度を良くするなど反射波を検出するための対策が必要となることを述べた。
4. 東八幡平フィールド実験において、ドップラー信号が計測されなかった原因として、散乱波を検出するに十分な S/N が得られなかったことが考えられた。そこで、ドップラー計測における流体からの散乱強度について理論的・実験的に検討し、実坑井においてドップラー計測を行うための計測条件を示した。

最後に、本研究を行うことで得られた知見をふまえて、本研究で取り扱った DBHTV の構造やトランスデューサの仕様などの計測システムに関する問題や、ドップラー計測を行うためのサンプルボリュームの位置や流体からの散乱強度などの計測条件に関する問題などの対策を考えた DBHTV の構成法を示した。

本研究では、坑井内計測が可能なシステムを具体的に設計・製作し、実計測における問題点を明らかにした。さらに、それらの問題点について、理論的、実験的に検討を加え、その原因を明らかにするとともに、その対策を具体的に示し、DBHTV を実用可能にするための指針を与えた。

今後、DBHTV が実用化されることで、き裂の加圧試験と組み合わせることによる開口挙動計測、地圧の現位置評価、地下透水層分布計測などの地下計測に利用可能である。さらに、貯留層挙動や地下水理の解明などに応用可能であると考えられる。

論文審査結果の要旨

地下岩体中の流体挙動計測はこれからの環境技術，エネルギー・資源開発技術，廃棄物地下処分技術，地下空間利用技術，等で重要である。特に地下岩体中の個々のき裂を流れる流体の挙動を定量的に計測する技術が開発されればその意義は大きい。本論文は，超音波映像技術とドップラー計測技術を組み合わせた坑井内地下流体挙動映像化システムである，ドップラーボアホールテレビューアに関する研究成果をまとめたもので全文6章からなる。

第1章は緒論である。第2章では，室内モデル実験により，超音波映像技術とドップラー計測を両立させた地下流体挙動映像化システムが原理的に実現可能なことを示すとともに，流速分布計測における空間分解能と計測可能な流速範囲について理論的，実験的に検討を加えている。さらに，パルスドップラー法とパルスペアー法を併用することにより，坑井内でのリアルタイム計測が可能なことを示している。

第3章では，第2章で得られた知見と既存のボアホールテレビューアの仕様を踏まえ，坑井内計測システムとしてのドップラーボアホールテレビューアの設計に関して論じている。まず，超音波トランスジューサによる超音波パルスの送信と坑壁からの反射波検出，ならびに流体による散乱波からドップラー信号を検出するためのシステム構成を具体的に検討するとともに，坑井内環境下において計測するための実装方法を提示している。

第4章では，第3章において設計されたドップラーボアホールテレビューアを製作し，室内実験ならびにフィールド実験によりその動作試験を行ったことについて述べている。そこでは，まず，電子回路実装上の問題とその解決法を示し，次に，完成したシステムについて，実験によりその基本特性を評価した結果を示している。

第5章では，システムの試作ならびにその評価により明らかになった問題点とその解決法を提示している。すなわち，トランスジューサの回転にともなう不要ドップラー信号の発生メカニズム，ならびに，トランスジューサ近傍の多重反射によるドップラー信号への雑音混入のメカニズムに関して理論的検討を行いそれらの原因を特定するとともに，その具体的解決策について述べている。これらは重要な結果である。さらに，本研究を通して明らかになった知見をもとに，ドップラーボアホールテレビューアの構成法について体系的にまとめている。第6章は結論である。

以上，要するに本論文は，地下岩体中の流体挙動計測のための新しい坑井内計測システムを提示し，さらに実験によってその有効性を実証したもので，地球工学ならびに地球計測工学の発展に寄与するところが少なくない。

よって，本論文は博士（工学）の学位論文として合格と認める。